

- Самарской области: Отчет о НИР [Электронный ресурс]. URL: <http://docme.ru/doc896364/2011-otchet-vie> (дата обращения 25.11.17)
7. Гусева О. А., Ендальцев К. О. Использование гидравлической энергии водопроводных систем // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. Курган, 2017. С. 114–117.
8. О реализации пилотного проекта «Малая ГЭС на сбросном коллекторе городских очистных сооружений канализации» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.energosovet.ru/bul\\_stat.php?idd=358](http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=358) (дата обращения 25.11.17)
9. Первая в Сибири мини-ГЭС на сточных водах появилась в Томске [Электронный ресурс]. URL: <https://www.riatomsk.ru/article/20140909/02086/> (дата обращения 25.11.17)
10. Гусева О. А., Пташкина-Гирина О. С. Оценка целесообразности электроснабжения от малых ГЭС // Вестник ИрГСХА. 2017. № 81-2. С. 105–111.
11. Низамутдинова Н. С., Пташкина-Гирина О. С., Низамутдинов Р. Ж. Экономическая оценка проектов возобновляемой энергетики // Материалы 67-й научной конференции. Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. Челябинск : Южно-Уральский государственный университет, 2015. С. 1172–1178.

УДК 533.17; 62-832

## **РАЗРАБОТКА ГОРЯЧЕГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ АНОДНЫХ ГАЗОВ ТОТЭ**

## **HOT-GAS EJECTOR DESIGN FOR ANODE GAS RECIRCULATION IN THE SOFC POWER UNIT**

Ершов М. И., Севастьянов М. М., Довгалюк И. В., Волкова Ю. В.,  
Мунц В. А.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,  
[jv.volkova@urfu.ru](mailto:jv.volkova@urfu.ru)

Ershov M. I., Sevastyanov M. M., Dovgaluk I. V., Volkova Y. V.,  
Munts V. A.

Ural Federal University, Ekaterinburg

**Аннотация:** В работе выполнен конструктивный расчёт высокотемпературного эжектора для энергетической установки на ТОТЭ. Также с помощью программного комплекса вычислительной гидродинамики AnsysFluent построены поля давлений и чисел Маха для коэффициента эжекции 2,43. Результаты расчёта показывают, что спроектированная геометрия проточной части будет устойчиво работать в расчётном режиме.

**Abstract:** The hot-gas ejector for the SOFC power unit was designed. Furthermore, plots of pressure and Mach number inside the ejector were obtained for the entrainment ratio of 2.43 using Ansys Fluent CFD software. The results indicate this device will operate steadily at the design point.

**Ключевые слова:** ТОТЭ; эжектор; коэффициент эжекции.

**Key words:** SOFC; ejector; entrainment ratio.

Топливные элементы позволяют осуществить прямое преобразование химической энергии топлива в электричество. Для повышения эффективности и автономности энергетической установки на твёрдооксидных топливных элементах организуют рециркуляцию анодных газов [1]. В этом случае часть уходящих из анода газов подается в риформер, где протекают две реакции – парового и углекислотного риформинга [2, 3].

Одной из основных задач при создании энергетической установки на ТОТЭ с рециркуляцией анодных газов является обеспечение возврата необходимого количества уходящих газов, которого достаточно для протекания реакций в риформере с отсутствием сажеобразования.

Для нахождения минимального значения степени рециркуляции, обеспечивающей отсутствие сажеобразования при заданной температуре в риформере, можно использовать систему нелинейных уравнений, приведенных в [4], основанных на уравнениях баланса компонентов и констант равновесий реакций. Было установлено, что

коэффициент эжекции находится в диапазоне от 2,4 до 3,8 для режимов работы без сажеобразования.

Авторами работы было выполнено конструирование эжектора (рис. 1), работающего в номинальном режиме работы энергоустановки. При проектировании эжектора были определены основные сечения эжектора, а также его осевые размеры в соответствии с [5, 6]. При испытании на азоте/воздухе при температуре 20 °С под абсолютным давлением 2 бар массовый расход азота через сопло диаметром 0,74 мм составит  $2,02 \cdot 10^{-4}$  кг/с.

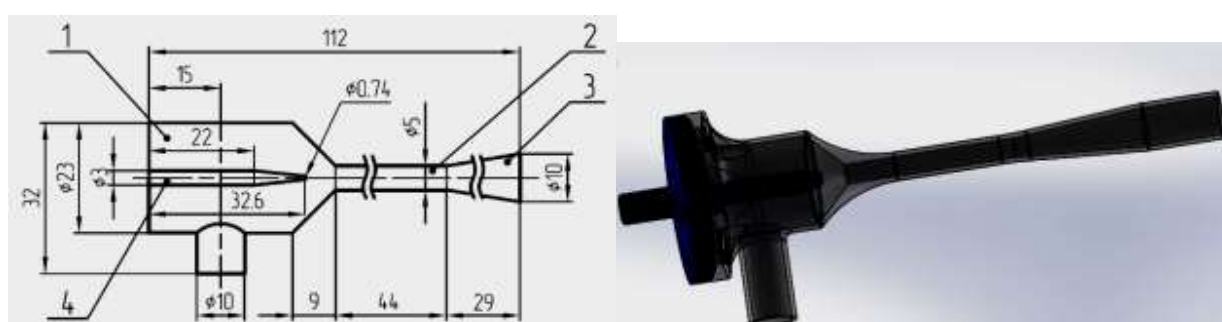


Рис. 1. Геометрия и 3D модель проточной части эжектора

1 – всасывающая камера; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – сопло

С использованием AnsysFluent [7, 8] была численно смоделирована работа проточной части эжектора при температурах потоков 20 °С, коэффициенте эжекции 2,43 и абсолютном давлении на всасе 1 бар. При построении поля давлений был отображён диапазон давлений от 97,2 до 103,4 кПа (рис. 2), чтобы детально показать градиент давления в камере смешения и диффузоре, процессы в которых до сих пор не изучены до конца [9]. Поле чисел Маха (рис. 3) свидетельствует о том, что за звуковым соплом наблюдается максимум скорости потока (1,06 Маха), а затем он резко замедляется и не прилипает к стенкам камеры смешения, что обеспечивает надежную и симметричную работу эжектора.

Таким образом, геометрия проточной части эжектора была получена из конструктивного расчёта. Основой расчёта послужили номинальные параметры энергоустановки, а также диапазон коэффициентов эжекции от 2,4 до 3,8, обеспечивающий работу риформера без сажеобразования. Компьютерное моделирование

полей давлений и чисел Маха для работы эжектора на азоте/воздухе при температуре 20 °С и коэффициенте эжекции 2,43 доказало его устойчивую работу на данном режиме.

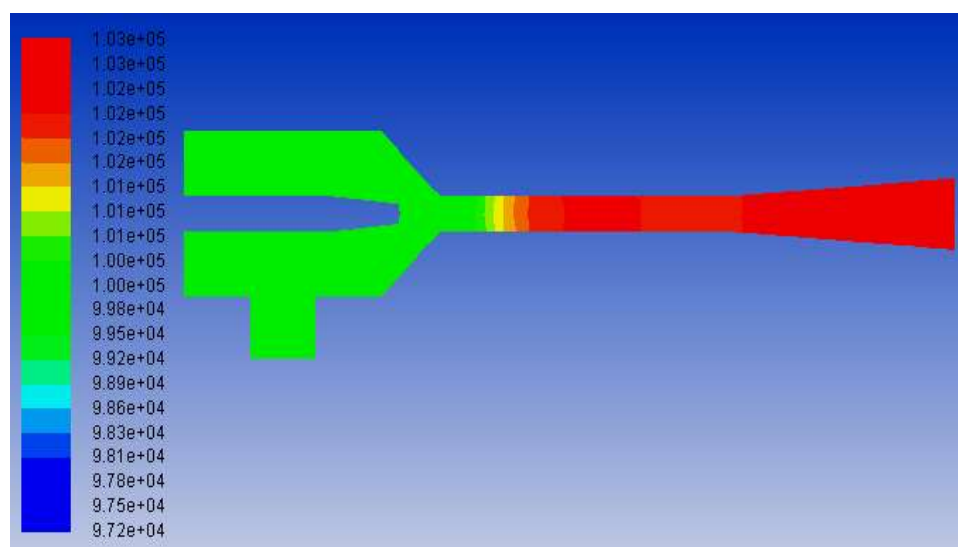


Рис. 2. Поле давлений в проточной части эжектора

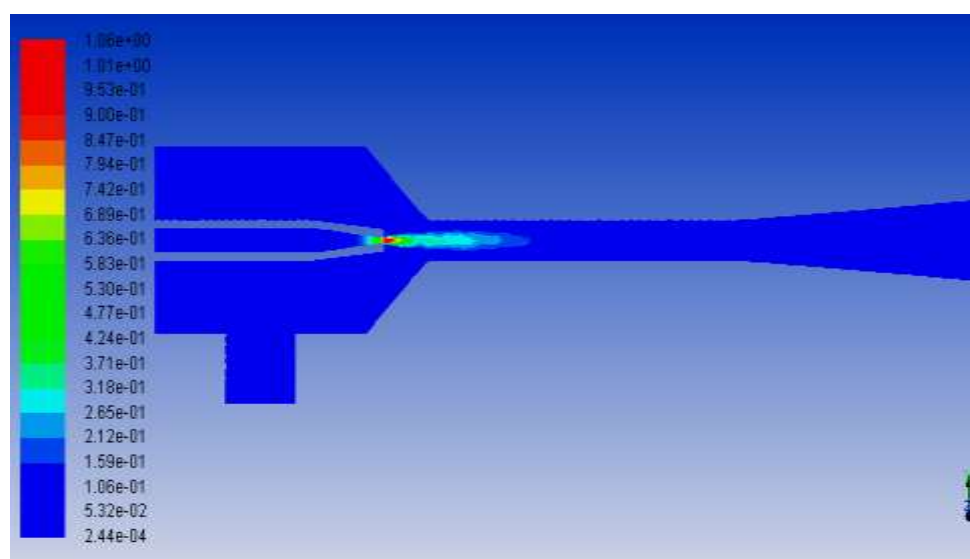


Рис. 3. Поле чисел Маха в проточной части эжектора

#### Список использованных источников

1. Thijssen J. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). P.O. Box 880 Morgan-town: EG&G Technical Services, Inc. US-Departament of Energy, Office of Fossil Energy, 2004. P. 458.
2. Liso V., Olesen A. C., Nielsen M. P., Kaer S. K. Performance comparison between partial oxidation and methane steam reforming processes for solid oxide fuel cell (SOFC) micro combined heat and power (CHP) system // Energy. 2011. № 36. P. 4216–4226.

3. Liso V., Nielsen M. P., Kær S. K. // Sustainable J. Energy Technologies and Assessments. 2014. № 8. P. 99–108.
4. Baskakov A. P., Volkova J., Plotnikov N. S. Optimum chemical re-generation of the gases burnt in solid oxide fuel cells // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol. 87. № 4. P. 763–772.
5. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. 3-е изд., пер. М. : Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
6. Yinhai Zhu, Wenjian Cai, Changyun Wen, Yanzhong Li. Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system // Journal of Power Sources. 2007. № 173. P. 437–449.
7. САЕ-система ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 07.02.2017).
8. Денисов М. А. Разработка учебно-справочного комплекса проектного моделирования в пакете ANSYSWorkbench // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса.– Екатеринбург : Уральский рабочий, 2013. – С. 95–96.
9. Gnani F., Zare-Behtash H., Kontis K. Pseudo-shock Waves and their Interactions in High-speed Intakes // Progress in Aerospace Sciences. 2016. Vol. 82. P. 36–56.

УДК 533.17; 62-832

## **РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЖЕКТОРА ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ТОТЭ: ХОЛОДНЫЕ ГАЗЫ**

### **COMPUTATION OF THE EJECTOR CHARACTERISTICS FOR THE SOFC POWER UNIT: COLD GASES**

Ершов М. И., Чойнзонов Д. Б., Дизер М. Г., Тарасов С. С.,  
Щербинин К. А., Мунц В. А.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,  
[mikhail.ershov@urfu.ru](mailto:mikhail.ershov@urfu.ru)

Ershov M. I., Choynzonov D. B., Dizer M. G., Tarasov S. S.,  
Scherbinin K. A., Munts V. A.

Ural Federal University, Ekaterinburg

**Аннотация:** В работе представлено два метода расчёта характеристики эжектора: численный и аналитический.